ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 620.193-047.42(075.8)
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-14-23

Научная статья

Свойства салицилиден-анилина как ингибитора коррозии в системах транспортировки нефти и нефтепродуктов

С.Г. Курень ✉[1], **С.А. Воляник**[2], **М.А. Савенкова**[2], **Э.А. Зайцева**[3]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉sergejgrigorevich@yandex.ru

Аннотация
Введение. Значимая проблема техносферной безопасности — риски аварий и пожаров при транспортировке и перекачке нефти и нефтепродуктов. Причинами могут быть утечки из-за коррозионных повреждений трубопроводов, цистерн, резервуаров нефтехранилищ. Ввиду возможных серьезных финансовых, экологических и социальных последствий таких происшествий важно постоянно изыскивать новые, более эффективные, подходы к предотвращению коррозионных процессов. Очевидно, например, что в настоящее время досконально изучены далеко не все химические соединения, способные подавлять или тормозить разрушение металлов и сплавов. Представленная научная работа призвана отчасти преодолеть недостаток данных в этой области. Цель — исследовать малоизученное соединение салицилиден-анилин, которое может быть ингибитором коррозии аналогично другим, сходным по строению и составу азотсодержащим составам.
Материалы и методы. Для исследования ингибиторных, адсорбционных и комплексообразующих свойств салицилиден-анилина использовали гравиметрический метод. Проводили опыты с пластинами из стали Ст3. Фиксировалась масса металлических образцов без ингибитора и с ингибитором до и после выдержки в испытуемых средах. Эффект определяли по изменению скорости коррозии. При постановке экспериментов ориентировались на ГОСТ 9.905–82 «Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний». Объем коррозионной среды определили по ГОСТу 9.506–87 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов в водно-нефтяных средах». Критерии коррозии взяли из ГОСТа 9.908–85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости». Расчеты основывались на принципе оценивания, который задает отношение мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев. Для ранжирования использовали интегральный показатель, основанный на математическом и методическом подходах.
Результаты исследования. Изучено воздействие солянокислой среды на образцы стали Ст3. Брали четыре концентрации ингибитора: 0 %, 0,01 %, 0,1 %, 0,2 %. Зафиксировали массу металлических образцов без ингибитора и с ингибитором до и после выдержки в испытуемых средах. Эффект определили по изменению скорости коррозии. Рассчитали массовый показатель коррозии. Качество поверхности при разрушении и ингибировании коррозии определяли в пять этапов: выбрали оцениваемые элементы, сформулировали цель оценивания, нашли элементы технического состояния исследуемого объекта, описали суть определения полезности или ценности критерия, пояснили суть оптимизации. Исследуемые свойства ранжировали по отношению мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев. Для расчетов поставили задачу — определить компоненты вектора B в соответствии с одним из этапов оценки. Речь идет о стадии, когда полезность или ценность критерия анализируется по точкам на числовой оси, указывающим на состояние объекта «лучше — хуже». Построили показатель z, аппроксимирующий известную или задаваемую (обучающую) матрицу парных взаимосвязей между объектами.

Полученный в итоге показатель позволяет оценивать техническое состояние поверхности в процессе протекания коррозии и при ее замедлении за счет добавления салицилиден-анилина. Получен результат для образцов с площадью поверхности от $10{,}1 \cdot 10^{-4}$ м^2 до $11{,}9 \cdot 10^{-4}$ м^2. За время эксперимента масса металла уменьшалась в 0,2–0,8 раза с ингибитором и почти в 3,5 раза без него. Фиксировался массовый показатель коррозии от 0,15 г/м^2·ч до 0,48 г/м^2·ч. При этом защитная способность ингибитора оказалась достаточно высокой: минимальная — 77,4 %, максимальная — 94,8 %. Это убедительный показатель. Стоит также упомянуть такое преимущество салицилиден-анилина, как невысокая опасность. Класс его опасности — III (для сравнения: класс опасности анилина на уровень выше — II).

Обсуждение и заключение. Предлагается использовать салицилиден-анилин как средство, повышающее срок безопасной службы нефтепроводов и цистерн. Доказан потенциал этого состава как эффективного ингибитора коррозии, хорошо растворимого в нефти и нефтепродуктах. Отмечены такие свойства салицилиден-анилина, как медленное окисление и умеренная токсичность.

Ключевые слова: игибиторные свойства салицилиден-анилина, защитная способность ингибитора, ингибирующие добавки, способность к комплексообразованию, концентрация ингибитора

Благодарности: авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи. Авторы также выражают особую благодарность коллеге Зайцевой М.М., доценту, кандидату технических наук, за значительный вклад в обсуждение результатов и ценные замечания при оформлении данной работы.

Для цитирования. Курень С.Г., Воляник С.А., Савенкова М.А. Зайцева Э.А. Свойства салицилиден-анилина как ингибитора коррозии в системах транспортировки нефти и нефтепродуктов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):14–23. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-14-23

Original article

Properties of Salicylidene-Aniline as a Corrosion Inhibitor in Oil and Petroleum Products Transportation Systems

Sergey G. Kuren ✉[1], Svetlana A. Volyanik[2], Mariya A. Savenkova[2], Elvira A. Zaitseva

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sergejgrigorevich@yandex.ru

Abstract

Introduction. Risks of accidents and fires during transportation and pumping of oil and petroleum products is a significant problem of technosphere safety. The reasons may be leaks due to corrosion damage to pipelines, tanks and oil storage tanks. In view of the possible serious financial, environmental and social consequences of such incidents, it is important to constantly seek new, more effective approaches to preventing corrosion processes. It is obvious, for example, that at present not all chemical compounds capable of suppressing or inhibiting the destruction of metals and alloys have been thoroughly studied. The presented scientific work is partly aimed at overcoming the lack of data in this area. The objective is to investigate an insufficiently studied compound salicylidene-aniline, which can be a corrosion inhibitor similar to other nitrogen-containing compounds similar in structure and composition.

Materials and Methods. The gravimetric method was used to study the inhibitory, adsorption and complexing properties of salicylidene-aniline. The experiments were carried out with St3 steel plates. The mass of metal samples without an inhibitor and with an inhibitor was recorded before and after exposure in the test media. The effect was determined by the change in the corrosion rate. When setting up experiments, the authors were guided by GOST 9.905–82 "Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion test methods. General requirements". The volume of the corrosive medium was determined according to GOST 9.506–87 "Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion inhibitors of metals in water-petroleum media. Methods of protective ability evaluation". The corrosion criteria were taken from GOST 9.908–85 "Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices". The calculations were based on the valuation principle, which sets the ratio of a multiplicative metrized linear order on a set of particular criteria. An integral indicator based on mathematical and methodological approaches was used for ranking.

Results. The effect of hydrochloric acid medium on steel samples St3 was studied. Four concentrations of the inhibitor were taken: 0 %, 0.01 %, 0.1 %, and 0.2 %. The mass of metal samples without an inhibitor and with an inhibitor was recorded before and after exposure in the test media. The effect was determined by the change in the corrosion rate. The mass index of corrosion was calculated. The surface quality during destruction and corrosion inhibition was determined in five stages: the elements to be evaluated were selected, the purpose of the evaluation was formulated, the elements of the technical condition of the object under study were found, the essence of determining the usefulness or value of the criterion was described, and the essence of optimization was explained. The studied properties were ranked with respect to the multiplicative metrized linear order on a set of particular criteria. For the calculations, the task was set — to determine the components of vector B in accordance with one of the evaluation stages. We are talking about the stage when the usefulness or value of the criterion is analyzed by points on the numerical axis indicating the state of the object "better — worse". We constructed an indicator z approximating a known or specified (learning) matrix of paired relationships between objects. The resulting indicator allowed us to assess the technical condition of the surface during the course of corrosion and when it slowed down due to the addition of salicylidene-aniline. The result was obtained for samples with a surface area from $10.1 \cdot 10^{-4}$ m^2 to $11.9 \cdot 10^{-4}$ m^2. During the experiment, the mass of the metal decreased by 0.2–0.8 times with the inhibitor and almost by 3.5 times without it. The mass index of corrosion was recorded from 0.15 $g/m^2 \cdot h$ to 0.48 $g/m^2 \cdot h$. At the same time, the protective ability of the inhibitor was quite high: the minimum was 77.4 %, the maximum was 94.8 %. This is a convincing indicator. It is also worth mentioning such an advantage of salicylidene-aniline as a low danger. Its hazard class is III (for comparison: the hazard class of aniline is a level higher — II).

Discussion and Conclusion. The authors propose to use salicylidene-aniline as a means to increase the safe service life of oil pipelines and tanks. The potential of this composition as an effective corrosion inhibitor, highly soluble in oil and petroleum products, has been proven. Such properties of salicylidene-aniline as slow oxidation and moderate toxicity are noted

Keywords: inhibitory properties of salicylidene-aniline, protective ability of the inhibitor, inhibitory additives, ability to complex formation, inhibitor concentration

Acknowledgements: the authors would like to thank the Editorial Board of the journal and the Reviewer for their professional analysis and suggestions made that helped to improve its quality. The authors also express special gratitude to their colleague MM Zaitseva, associate professor, Cand. Sci. (Eng.) for a significant contribution to the discussion of the results and valuable comments in the design of this work.

For citation. Kuren SG, Volyanik SA, Savenkova MA, Zaitseva EA. Properties of Salicylidene-Aniline as a Corrosion Inhibitor in Oil and Petroleum Products Transportation Systems. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3): 14–23. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-8-3-14-23

Введение. Транспортировка и хранение агрессивных жидкостей, в том числе нефти и нефтепродуктов, генерируют риски аварий с тяжелыми последствиями. Особого внимания требует состояние труб и емкостей, возможность их повреждения. Нефтепроводы, железнодорожные цистерны и автоцистерны постоянно контактируют с агрессивной средой. Их делают из стали, что ставит вопрос о предупреждении или замедлении коррозионных процессов. Последствиями такого разрушения могут быть аварии и катастрофы, сопровождающиеся пожарами и взрывами.

Ингибиторами коррозии могут быть азотсодержащие органические основания, в первую очередь алифатические и ароматические амины и их производные [1–3]. Азометины — это производные аминов. Они перспективны как слабоосновные ингибиторы (рКа-основания на 1–2 порядка меньше, чем у исходных аминов).

Анилин (фениламин) $C_5H_5NH_2$ применяют, в частности, для повышения антидетонации топлива. При содержании 1 % анилина октановое число бензина повышается на 3–4 единицы. Однако в чистом виде анилин лучше не использовать. При длительном хранении такая присадка окисляется, что снижает качество бензина. Производные анилина, например фосфаты, добавляют к растворам сильных электролитов для ингибирования коррозии углеродистой стали.

Класс опасности анилина — II (высокоопасное вещество), а салицилиден-анилина — III (умеренно опасное). Меньшая опасность салицилиден-анилина — убедительное основание для пристального изучения его антикоррозионных свойств. К тому же известные защитные возможности гетероароматических соединений на примере пиперидинов однозначно подтвердили их качества как ингибиторов кислотной коррозии нелегированной стали Ст3 [3]. При этом во взаимодействии с положительно заряженными ионами

корродирующего металла образуются малорастворимые вещества. Они осаждаются в виде сверхтонких пленок (не более 10 нм) и защищают от дальнейшего коррозионного поражения.

Противокоррозионные защитные химические вещества используют как ингибирующие добавки — присадки к агрессивным средам и в комплексе с защищающими покрытиями [2–3]. Комплексообразователи с антикоррозионными свойствами: комплексоны (например, этилендиаминтетраацетат натрия (трилон Б) $Na,H(OOCCH_2)_2N — (CH_2)_2 — N(CH_2COO)_2 Na,H$), различные комплексные соединения d-элементов и смеси на их основе. Ведущее место в этой группе занимают фосфонаты щелочных и щелочноземельных металлов [1–5].

В другую группу входят азот- и серосодержащие гетероциклы. Азотсодержащие соединения образуют менее токсичные продукты взаимодействия с коррозионной средой, поэтому они предпочтительнее для разработки и создания эффективных антикоррозионных присадок [3].

В качестве защитных противокоррозионных средств для стали Ст3 хорошо зарекомендовали себя четвертичные аммониевые соли алифатических и гетероароматических азотистых оснований, в том числе производные спиртов, альдегидов, карбоновых кислот. Они хорошо растворяются и устойчивы в рабочих средах, действуют в большом интервале pH [6].

При этом ввиду потенциальных серьезных финансовых, экологических и социальных угроз, связанных с коррозией систем транспортировки нефти и нефтепродуктов, следует непрерывно искать более эффективные подходы к предотвращению разрушающих процессов. Очевидно, например, что досконально изучены далеко не все химические соединения, способные подавлять или тормозить разрушение металлов и сплавов. Представленная научная работа призвана пополнить данные в этой области.

Цель исследования — создание композиций с высокими противокоррозионными свойствами на базе производных анилина и соединений класса азометинов. Производным анилина является представитель класса азометинов — салицилиден-анилин. Полагаем, что этот состав или композиции на его основе целесообразно использовать как ингибитор коррозии стали, что в итоге повысит безопасность транспортировки нефти и нефтепродуктов.

Материалы и методы. Изучались следующие особенности салицилиден-анилина:

– ингибиторные свойства;
– противокоррозионная активность;
– способность к комплексообразованию;
– адсорбционные возможности.

Молекулы ингибитора образуют контактный слой на поверхности металла за счет донорно-акцепторной связи между электронными парами атомов азота и свободными d-орбиталями атома комплексообразователя (в данном случае — железа). Такие соединения образуют более прочную пленку, чем у многих других ингибиторов. В результате на поверхности стали формируются микрогальванические пары и происходит анодная и катодная деполяризация, за счет которой проявляются защитные свойства ингибитора.

В работе задействовали гравиметрический метод исследования [1]. Он основан на фиксации массы металлических образцов без ингибитора и с ингибитором до и после выдержки в испытуемых средах. По изменению скорости коррозии оценивается противокоррозионная активность испытуемого соединения. Для каждого образца время выдерживания в ингибированной среде равно времени в среде без антикоррозионного агента [1–3].

Для исследования по ГОСТ 9.905–82 «Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний» использовались пластины из стали марки Ст3. Объем коррозионной среды (0,25н HCl) — 30 $см^3$ в соответствии с ГОСТ 9.506–87 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов в водно-нефтяных средах». В среду добавляли по 0 %, 0,01 %, 0,1% и 0,2 % салицилиден-анилина. Критерии коррозии — по ГОСТ 9.908–85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости».

Результаты исследования. Рассматривалось воздействие солянокислой среды на образцы стали. Фиксировали результаты с учетом разных концентраций салицилиден-анилина и таким образом определяли противокоррозионный эффект (рис. 1).

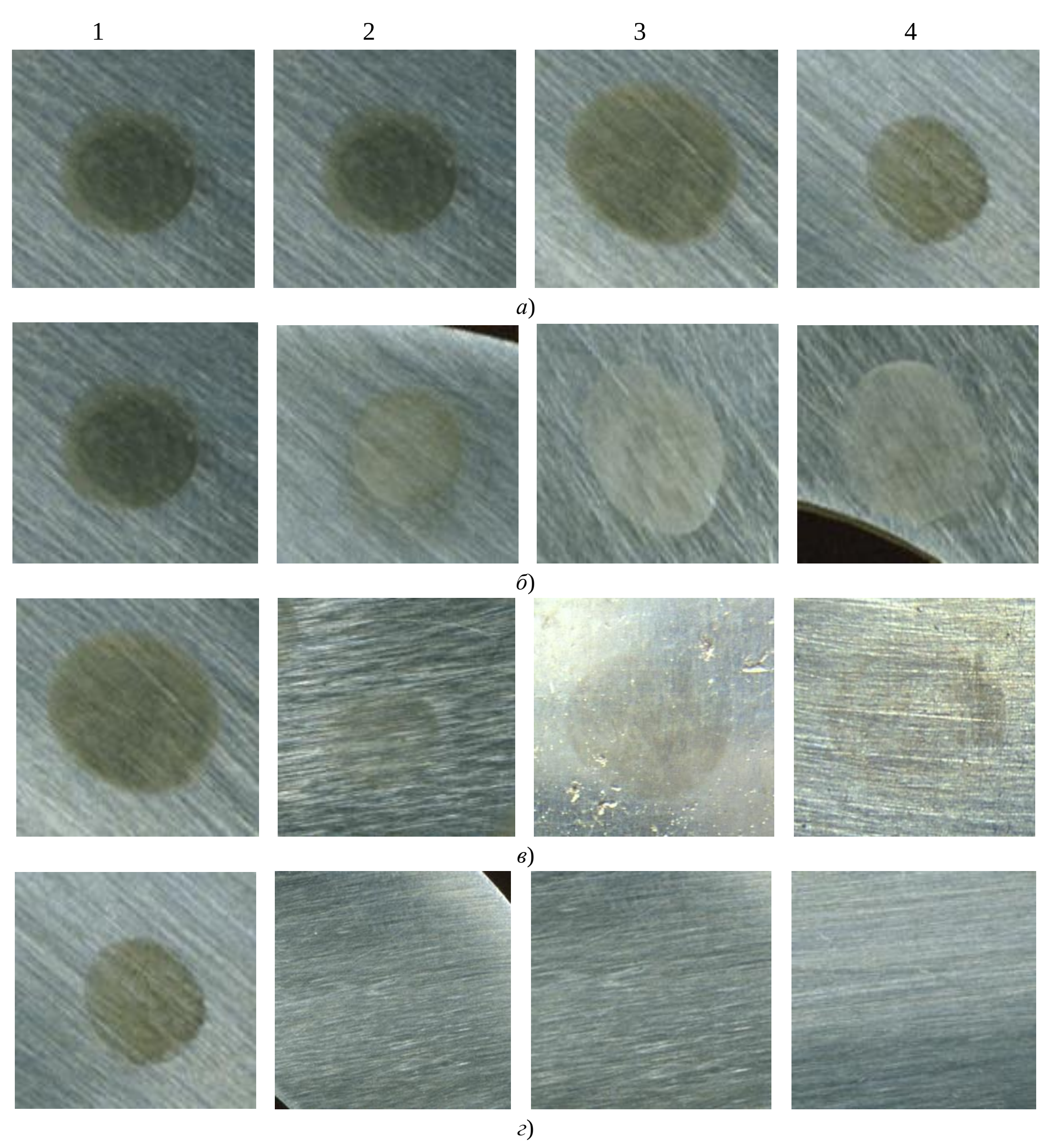


Рис. 1. Фото коррозионного поражения — вид пятна ржавчины на поверхности образцов стали Ст3 в солянокислой среде при концентрациях ингибитора, %: *а* — 0; *б* — 0,01; *в* — 0,1; *г* — 0,2. Образцы пронумерованы сверху, их изображения после воздействия расположены вертикально

Массовый показатель коррозии j рассчитывали по формуле:

$$j = \Delta m / (S \cdot \tau), \text{г / м}^2 \cdot \text{ч или г / м}^2 \cdot \text{год},$$

где Δm — уменьшение массы металла (г) при коррозии металла в течение времени τ (час или год) на поверхности S (м^2).

Качество поверхности при коррозии и ее ингибировании (рис. 1), оценивается в пять этапов [7].

1. На основе предварительного анализа ставится проблема, указываются оцениваемые элементы.
2. Структурный анализ позволяет сформулировать основную цель оценивания и возможности ее достижения.
3. Для анализа неопределенности ведется поиск объединяющих элементов действительного технического состояния объекта.
4. Полезность или ценность критерия анализируется по точкам числовой оси, указывающим на состояние объекта «лучше — хуже».
5. Оптимизация представляет собой поиск пути к достижению необходимого технического состояния.

Методы построения структуры целей и формирование перечня критериев рассмотрены в [8]. Предполагается, что задан исходный массив объектов и в исследовании выявляются лучшие из них по техническому состоянию. Ранжирование проводится по специальному интегральному показателю, основанному на математическом и методическом подходах. Главные принципы отбора описаны в [9].

Основной элемент рассматриваемого подхода — правило (или принцип) оценивания π, задающий отношение мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев.

Для пары объектов a_ν и a_μ выбор базируется на следующих принципах:

– $a_\nu > a_\mu$ — первый объект по рассматриваемым факторам «лучше» второго;

– $a_\nu \sim a_\mu$ — объекты оценены одинаково;

– $a_\nu < a_\mu$ — первый объект по рассматриваемым факторам «хуже» второго.

Пары объектов характеризуются векторами сравнений $S_{\nu\mu}$. Для исследования полезен принцип обобщенного критерия и так называемые лексикографические подходы — с сильным предпочтением на множестве частных критериев. В данном варианте объекты равноценны ($a_\nu \sim a_\mu$), а их оценки соответствуют установленным минимальным величинам [10].

Рассмотрим условие:

$$a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow x_i^\nu \geq d_i,\ \ x_i^\mu \geq d_i\ , i = 1, \ldots, m,$$

где d_i — заданное пороговое значение (уровень достаточности); m — количество рассматриваемых показателей; $x_{i\nu}$ и $x_{i\mu}$ — оценки сравниваемых объектов (ν-го и μ-го).

Прямое использование этого принципа ограничивается возможностью его применения на практике, так как предполагает сильное предпочтение на множестве критериев $K = \{K_1, K_2, \ldots, K_m\}$ в виде:

$$K_1 \geq K_2 \geq K_3 \geq \cdots \geq K_m.$$

Целесообразнее задать метризованное мультипликативное отношение линейного порядка, то есть применить обобщенный критерий.

В этом случае

$$a_\nu \succ a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} a_i K_i(a_\mu);\ \ a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} a_i\, K_i(a_\nu) = \sum_{i=1}^{m} a_i K_i\,(a_\mu).$$

Здесь a_i — коэффициенты, удовлетворяющие, например, условию

$$\sum_{i=1}^{m} a_i = 1.$$

Задача заключается в определении компонент вектора B в соответствии с 4-м этапом оценки и построении показателя z, аппроксимирующего объективно известную или специально задаваемую (обучающую) матрицу парных взаимосвязей между искусственными объектами (в [11] это были транспортные средства):

$$Q = \| q_{rk} \|_{p,p}\ .$$

Здесь p — количество рассматриваемых искусственных объектов, которое определяет размер матрицы Q; q_{rk} — элементы матрицы; r, k — искусственные объекты на числовой оси «лучше — хуже».

На оси показателя z квадрат расстояния между r-м и k-м искусственными объектами (вариантами защиты) имеет вид:

$$d_{rk}(B) = (z_r - z_k)^2 = \left[\sum_{j=1}^{m} b_j\big(x_{rj} - x_{kj}\big)\right]^2,$$

$$D(B) = \| d_{rk} \|_{p,p}\ .$$

Матрица D (B) оценивается с помощью функционала

$$J(B) = \sum_{r=1}^{p-1} \sum_{k=r+1}^{p} [d_{rk}(B) - q_{rk}]^2.$$

Искомым интегральным критерием является функция Z, если $J(B)$ минимальна и вектор B соответствует поставленным условиям. Полученный показатель применяем для оценивания технического состояния качества поверхности в результате протекания коррозии и ее замедления за счет добавления салицилиден-анилина (таблица 1, рис. 1).

Таблица 1

Антикоррозионные свойства салицилиден-анилина для стали Ст3

Номер образца	S, 10^{-4} м^2	τ, ч	$\Delta m = m_0 - m$, г	Концентрация ингибитора, %	Массовый показатель коррозии j, г/м^2·ч ($j = \Delta m / S \cdot \tau$)	Защитная способность ингибитора Z, %
1	10,22	120	3,4590	0	2,8205	–
2	10,11	120	0,7815	0,01	0,4793	77,4
3	11,9	120	0,3363	0,1	0,2542	90,2
4	11,13	120	0,1805	0,2	0,1482	94,8

Как видно из таблицы и рис. 1, коррозионное поражение поверхности стали уменьшается при увеличении концентрации салицилиден-анилина.

Для объяснения антикоррозионной активности и хорошей адсорбционной способности N-салицилиден-анилина на стальной поверхности теоретически изучили его фотоинициированную структурную нежесткость. Это позволило выяснить, в какой таутомерной форме данная структура имеет большую энергию комплексообразования адсорбционных комплексов на поверхности защищаемого металла [12–16].

Фотохромный переход кетонной формы в енольную обеспечивается переносом протона между изомерными формами молекулы N-салицилиден-анилина.

Полуэмпирический метод квантовой химии PM3 (параметрический метод 3) задействовали для детального определения:

– последовательности элементарных стадий основного фотохромного процесса;

– геометрических характеристик всех промежуточных и конечных фотоокрашенных систем;

– распределения зарядов на атомах [17].

Салицилиден-анилин, как и другие анилы, представляет интерес из-за внутримолекулярной водородной связи, образованной между атомами кислорода и азота в более стабильной цис-енольной форме. Фактически формы OH и NH находятся в равновесии. В зависимости от положения атома водорода в этой связи O—H—N анилы проявляют две таутомерные формы: енол-иминную и кето-енаминную (рис. 2). Более стабильна цис-форма. Но транс-форма обладает лучшей адсорбционной способностью. Таутомерия возникает под действием таких внешних факторов, как облучение, температура и давление.

а) *б*)

Рис. 2. Кето-енольная таутомерия: *а* — СА (енол); *б* — кето-форма

При понижении температуры енольная форма переходит в кетонную. Нами доказано, что она лучше адсорбируется на стальной поверхности. Цис-енол бесцветен. При облучении ультрафиолетом превращается в транс-кетоформу красного цвета. Кето-изомер может обратимо обесцвечиваться термически или фотохимически при действии видимого света [18].

Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволяют утверждать, что салицилиден-анилин активно ингибирует коррозию стали Ст3. Степень защиты достигает 77,4–94,8 %.

Квантовохимические расчеты полуэмпирическим методом PM3 позволили объяснить фотохромизм салицилиден-анилина за счет кето-енольной таутомерии. Вследствие мономолекулярной прототропной дихотомии «кислота ↔ основание» салицилиден-анилин обладает фотохромизмом и люминесценцией. Это отличает его от других азометинов

Выявлена структура адсорбционного комплекса с большей энергией стабилизации, что объясняет лучшую адсорбционную способность кето-формы ингибитора.

Список литературы

1. Сабанов С.В., Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Определение первоочередности вывода в ремонт оборудования противокоррозионной защиты на участке газопровода в условиях ограничения финансирования. *Практика противокоррозионной защиты.* 2020;25(2):7–17. https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-1

2. Цыганкова Л.Е., Ким Я.Р. Новое поколение ингибиторов коррозии металлов для нефтехимической промышленности. В: *Тр. XVIII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии.* Т. 3. Москва; 2007. С. 467.

3. Soumen Mandal, Jitendra Kumar Singh, Dong-Eun Lee, Taejoon Park. Ammonium Phosphate as Inhibitor to Mitigate the Corrosion of Steel Rebar in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution. *Molecules*. 2020;25(17):3785. https://doi.org/10.3390/molecules25173785

4. Karthick Subbiah, Han-Seung Lee, Soumen Mandal, Taejoon Park. Conifer Cone (Pinus resinosa) as a Green Corrosion Inhibitor for Steel Rebar in Chloride-Contaminated Synthetic Concrete Pore Solutions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(36):43676–43695. https://doi.org/10.1021/acsami.1c11994

5. Пахомов В.С, Шевченко А.А. *Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии.* Москва: Химия, КолосС; 2009. 444 с.

6. Vigato P.A., Tamburini S., Bertolo L. The Development of Compartmental Macrocyclic Schiff Bases and Related Polyamine derivaties. *Coordination Chemistry Reviews*. 2007;251(11-12):1311–1492. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2006.11.016

7. Дерюшев В.В., Зайцева М.М., Косенко Е.Е. Мамбергер С.К. Оценка свойств антикоррозионных покрытий металлоконструкций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(4):24–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

8. Дерюшев В.В., Сидельникова Е.Г. Обобщенный показатель достаточности для оценивания технического состояния строительной и подъемно-транспортной техники. *Научное обозрение.* 2013;(9):164–167.

9. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. *Метрический анализ и обработка данных.* Москва: Физматлит; 2012. 308 с.

10 Дерюшев В.В., Косенко Е.Е., Косенко В.В. и др. Принятие технических решений в условиях неопределенности при наличии риска. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2019;(2):56–61. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-56-61

11. Касьянов В.Е., Демченко Д.Б., Косенко Е.Е. и др. Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(1):23–31. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

12 Зайцева М.М., Мегера Г.И., Копылов Ф.С. и др. Повышение безопасности работы техники путем обеспечения ее надежности. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2019;2:33–37.

13. Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Савенкова М.А. и др. Взаимодействие молекул фосфорсодержащих неорганических присадок с поверхностью железа: квантовохимический анализ. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения.* 2013;3(51):153–160.

14. Delley B. Time-dependent Density Functional Theory with DMol3. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2010;22(38):384208. https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/38/384208

15. Курень С.Г. *Изучение адсорбционных комплексов на поверхности металлов*. В: «Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии». Тр. X юбилейной междунар. науч. конф. Ставрополь; 2010. С. 247–249.

16. Курень С.Г. *Квантовохимическое моделирование адсорбционных процессов.* Ростов-на-Дону; 2012. 164 с.

17. Bravaya K.B., Bochenkova A.V., Granovsky A.A., Savitsky A.P., Nemukhin A.V. Modeling photoabsorption of the asFP595 chromophore 11. *Journal of Physical Chemistry A.* 2008;112(37):8804–8810. https://doi.org/10.1021/jp804183w

18. Bagaturyants A., Vener M. *Multiscale modeling in nanophotonics. Materials and simulations*. Abingdon: Jenny Stanford Publishing; 2017. 270 p. https://doi.org/10.1201/9781315109763

References

1. Sabanov SV, Nikulin SA, Karnavskiy EL. Determination of the priority of withdrawal to repair of equipment of anti-corrosive protection on the section of the gas pipeline in the conditions of restriction of financing. *Theory and Practice of Corrosion Protection.* 2020;25(2):7–17. https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-1

2. Tsygankova LE, Kim YaR. Novoe pokolenie ingibitorov korrozii metallov dlya neftekhimicheskoi promyshlennosti. In: *Tr. XVIII Mendeleevskogo s'ezda po obshchei i prikladnoi khimii*. Vol. 3. Moscow; 2007. P. 467.

3. Soumen Mandal, Jitendra Kumar Singh, Dong-Eun Lee, Taejoon Park. Ammonium Phosphate as Inhibitor to Mitigate the Corrosion of Steel Rebar in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution. *Molecules*. 2020;25(17):3785. https://doi.org/10.3390/molecules25173785

4. Karthick Subbiah, Han-Seung Lee, Soumen Mandal, Taejoon Park. Conifer Cone (Pinus resinosa) as a Green Corrosion Inhibitor for Steel Rebar in Chloride-Contaminated Synthetic Concrete Pore Solutions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(36):43676–43695. https://doi.org/10.1021/acsami.1c11994

5. Pakhomov VS, Shevchenko AA. *Khimicheskoe soprotivlenie materialov i zashchita ot korrozii*. Moscow: Khimiya, KolosS; 2009. 444 p.

6. Vigato PA, Tamburini S, Bertolo L. The Development of Compartmental Macrocyclic Schiff Bases and Related Polyamine derivatives. *Coordination Chemistry Reviews*. 2007;251(11-12):1311–1492. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2006.11.016

7. Deryushev VV, Zaytseva M., Kosenko EE, Mamberger SK. Evaluation of the properties of anti-corrosion coatings of steel structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(4):24–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

8. Deryushev VV, Sidelnikova EG. Generalized sufficiency indicator for the assessment of technical condition of construction and lifting-transportation machinery. *Nauchnoe obozrenie*. 2013;(9):164–167.

9. Kryanev AV, Lukin GV, Udumyan DK. *Metricheskii analiz i obrabotka dannykh*. Москва: Fizmatlit; 2012. 308 p.

10 Deryushev VV, Kosenko EE, Kosenko VV, Zaytseva MM. Technical decisions in uncertain environment at risk. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;(2):56–61. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-56-61

11. Kasyanov VE, Demchenko DB, Kosenko EE, Teplyakova SV. Method of machine reliability optimization using integral indicator. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(1):23–31. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

12. Zaytseva MM, Megera GI, Kopylov FS, Krymskiy VS. Improving safety of equipment by reliability provision. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;2:33–37. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-33-36

13. Kolesnikov VI, Migal YuF, Savenkova MA, Solodovnikova DN. Interaction of phosphorus-containing inorganic additives with iron surface: quantum-chemical analysis. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2013;3(51):153–160.

14. Delley B. Time-dependent Density Functional Theory with DMol3. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2010;22(38):384208. https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/38/384208

15. Kuren SG. *Izuchenie adsorbtsionnykh kompleksov na poverkhnosti metallov*. In: " Khimiya tverdogo tela: nanomaterialy, nanotekhnologii ". Tr. X yubileinoi mezhdunar. nauch. konf. Stavropol; 2010. P. 247–249.

16. Kuren SG. *Kvantovokhimicheskoe modelirovanie adsorbtsionnykh protsessov*. Rostov-on-Don; 2012. 164 p.

17. Bravaya KB, Bochenkova AV, Granovsky AA, Savitsky AP, Nemukhin AV. Modeling photoabsorption of the asFP595 chromophore 11. *Journal of Physical Chemistry A*. 2008;112(37):8804–8810. https://doi.org/10.1021/jp804183w

18. Bagaturyants A, Vener M. *Multiscale modeling in nanophotonics. Materials and simulations*. Abingdon: Jenny Stanford Publishing; 2017. 270 p. https://doi.org/10.1201/9781315109763

Поступила в редакцию 07.07.2023
Поступила после рецензирования 24.07.2023
Принята к публикации 03.08.2023

Об авторах:

Сергей Григорьевич Курень, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), AuthorID, ORCID, sergejgrigorevich@yandex.ru

Светлана Алексеевна Воляник, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой химии Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Мария Андреевна Савенкова, кандидат химических наук, доцент кафедры химии Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Эльвира Александровна Зайцева, студентка химического факультета Южного федерального университета (344090, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 7), ORCID, gems10@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

С.Г. Курень — научное руководство, формулирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение квантовохимических расчетов и эксперимента, корректировка выводов.

С.А. Воляник — проведение эксперимента, подготовка текста, формулирование выводов.

М.А. Савенкова —проведение эксперимента, анализ результатов исследований, доработка текста.

А.А. Зайцева — литературный и патентный поиск, подготовка текста, анализ результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 07.07.2023
Revised 24.07.2023
Accepted 03.08.2023

About the Authors:

Sergey G. Kuren, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Operation Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), AuthorID, ORCID, sergejgrigorevich@yandex.ru

Svetlana A. Volyanik, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor, head of the Chemistry Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya Sq., Rostov-on-Don, 344038, RF), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Mariya A. Savenkova, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of the Chemistry Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya Sq., Rostov-on-Don, 344038, RF), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Elvira A. Zaitseva, Student of the Chemical Faculty, Southern Federal University (7, Zorge St., Rostov-on-Don, 344090, RF), ORCID, gems10@rambler.ru

Claimed contributorship:

SG Kuren: academic advising; formulation of the basic concept, goals and objectives of the study; conducting quantum chemical calculations and experiment; conclusions correction.

SA Volyanik: conducting an experiment; text preparation; conclusions formulation.

MA Savenkova: conducting an experiment; research results analysis, finalizing the text.

AA Zaitseva: literary and patent search; text preparation; research results analysis.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.